第 41 卷　第 3 期
2023 年 9 月

天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 41,　No. 3
Sept., 2023

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2023.03.11

质能方程可能在星系中心的旋转黑洞中实现吗？

葛葆安[1]，部德福[2]

(1. 天津市科学技术协会，天津　300041；2. 中国科学院　上海天文台，上海　200030)

摘要： 讨论了爱因斯坦导出的质能方程。该方程暗示了能量与质量之间可能存在相互转化的关系。众所周知，从质量转化为能量可以通过核反应进行，但是能量是否能够在一定条件下转化为物质？探讨了这一问题，介绍了粒子物理中的有关实验，尤其重点指出一类天体物理黑洞中喷流物质来源的模型可能提供了能量转换为物质的重要例子。

关　键　词： 质能方程；光子；黑洞；守恒

中图分类号： P142.6　　　　**文献标识码：** C

1905 年是 20 世纪最伟大、最有影响力的科学家爱因斯坦爆发其物理才智的高峰年。他在这一年写下众多的科学论文。其中的五篇，包括“狭义相对论”，时至今日仍为物理界所熟知，且其中四篇对当今物理学影响巨大。当时，在其众多论文中，最受物理界瞩目的是解决“紫外危机”的外光电效应的论文：“关于光的产生和转换的一个启发性观点”。文中接受了普朗克的黑体辐射公式提出的假设：能量量子化。爱因斯坦在上述假设基础上提出“光量子”假说，成功解决了物理界在外光电效应实验上出现的困惑。该论文获得 1921 年诺贝尔物理学奖，同时他也成为量子力学最早奠基者之一。而后来广为人知的狭义相对论的论文：“论运动物体的电动力学”并没有被当时物理学界看中。而由此论文引出的另一篇文章：“物体的惯性与它所含的能量有关吗？”（即质能方程）更没有引起界内人士的关注。或许，当时物理界的研究热点另有方向。不久前，英国科学期刊《物理世界》主办了一次由读者投票评选历史上“最伟大公式”活动，当初并不被看好的“质能方程”名列前十大方程中第五名①。有的学者甚至认为：地球文明能够留给其他文明的三大“精髓”中包括了简明的质能方程。

收稿日期： 2023-06-06；　**修回日期：** 2023-07-06

通讯作者： 部德福，dfbu@shao.ac.cn

①十大方程：1) 麦克斯韦方程组；2) 欧拉公式；3) 牛顿第二定律；4) 勾股定理/毕达哥拉斯定律；5) 质能方程；6) 薛定谔方程；7) 1 + 1 = 2；8) 德布罗意方程；9) 傅立叶变换；10) 圆的周长公式。

爱因斯坦用最优美、最简洁的公式描述了各种宇宙现象中蕴含的一个基本原理。在上千年积累的物理学原理、公理及定理公式群中，能够描述我们地球，和我们能够触及到的宇宙空间所有发生的各种形形色色的现象中，质能方程最精确地表达了它们的本质：质量 (物质) 和能量，是等值的，是可能互换的。作为一个严肃的科学工作者，爱因斯坦还是慎重的，他从未讲过可以互换。因为在他生活的年代，既找不到、也无法设想某种实验，可以证明它们能够互换。终究，物理学是尊重实验的科学，而且，在他的论文中出现的公式形式是：$M = E/C^2$。论文的命题也是用一种探索、探讨的方式出现。他只想指出两者是相同的东西，它们是一体两面，而且公式只表明物质中包含能量，是能量的另一种表达，是作为“论运动物体的电动力学”的论文中，提出统一“时间和空间”的概念后的进一步推论：统一“质量和能量”。

当然，质能方程还解释了众多天体的自然现象，包括以亿年计算，长久、稳定地向地球提供光和热的太阳能量的来源。同时，也开启了人类利用核能的时代。

当人们从物理学原理的角度审视这个“大道从简”的物理公式时，就会发现它尚有不能让物理学家完全理解的内涵，而且爱因斯坦没有进一步阐明其机理，也没有对其可能更深刻的内涵提出相应的求证实验，甚至没有像狭义相对论的论文那样提出“思路”性的实验来证实其内涵。

单从质能方程本身看，方程表达了质量 (物质) 内蕴藏着能量，而能量的聚集就是质量 (物质)。它们之间的关系是等价关系，其中每个物理量都不是独立存在的，是相互依存的关系，有多少能量就对应多少质量，反之亦然。不仅能量是守恒的，而且从质能关系来看，质量也是守恒的，质量不能被消灭，能量也不会消失。它们只能相互转移，只是度量单位不同，是构成宇宙的一对基本形态，具有同等意义。文章作者当时没有进一步探讨方程的物理内涵。

但是，质能方程还预示了有可能会在“某种或某些条件下”，物质与能量或许可以通过某种方式交换自己的形态。放射性、核反应、热核反应都已经证实，在地球上、太空里是可以通过物质质量的减少，将减少的部分转换成能量释放出来，且威力巨大。至于进一步的释放，或反向转化是不是有可能？这类话题谈得较少，不是热门话题。即使如此，还是有人关注，并研究了实验上的可能。

1934 年美国物理学家布莱特和惠勒 (Breit and Wheeler) 提出布莱量可以转化为物质的实验。他们设计的实验难度很大，因为直接转换至少需要一种在高度集中的离子中发射由伽马射线光子组成的激光。当时，甚至目前尚未能够开发出这样的激光器。当年，他们自己也认为该实验很难做到。但同时，他们还建议用另一种方式完成此[①]转化，即：加速的重离子作为光源而不是光子束，因为带强正电的原子核在极高加速度下能够在其周围产生强电磁场，它们的物理特性在某些条件下类似于光子。该理论认为，当一个离子在粒子加速器中移动时，它会被光粒子云包围着，当两个这样的原子在加速器中高速向对方移动几乎相撞时，

[①]据 2021 年 5 月 6 日期刊《光学设计》(Optica) 报导：韩国一组科学家正尝试用高强度激光研究光与光之间的互动产生正负电子对现象。

它们的光子云会相互作用，其中一部分光粒子是被大大加速的，高能量光粒子发生碰撞会出现成对的电子和正电子。根据当时的条件，按照后一个思路，实验也是很难做到的。不过，两位物理学家给后人留下的后一个验证思路，也是了不起的，是科学拓荒者的勇气。

热力学第二定律约束了人们的思维，这个科学公理提醒物理学界的泰斗，或许也包括爱因斯坦，不可能将散发的能量再集中、压缩和禁锢在一起，也不可能采取其他有效的办法将能量包 (光子) 转化为具有质量的、已知的物质。或许，在当年热议的“大爆炸”理论所认定的“奇”点内，是可以来实现能量转化为物质，因为“奇”点内所有的物理定律将不再起作用。至今，人们仍不知道如何创造和再现奇点的实验方法，只能在数学上演绎，或推理上判断，这也是“大爆炸”理论不断地被人们垢病的原因之一。在很长的时间内，质能方程只能看作是一个单向转换的公式。爱因斯坦在论文中也是小心翼翼地以提问的方式将其写成质量等于能量除以光速的平方 ($M = E/C^2$) 的形式。但是，物理界在讲述质能方程时，不论在课堂上，还是在讨论中，都将其表示为能量等于质量乘以光速的平方 ($M = E/C^2$)。质能方程还是被人们从广义上接受了。

导出质能方程已过百年。最近，一批物理学家重新回顾了布莱特 • 惠勒效应，利用布莱特 • 惠勒涉及的“加速重离子”的方法，已经在美国布鲁克海文国家实验室完成了该实验，结果已经在《Physical Review Letters》上发表[1]。实验结果为光子在碰撞中可以直接一步产生物质 (电子、正电子对) 提供了证据，表明了能量转化为物质的可能性。实验物理学家还检查了碰撞过程中产生的光子是否具有正常光粒子的特征，结果也是肯定的。这表明了物质和能量不仅是等价的，而且从另一个方向也是可能转换的。此项工作打开了人们对自然界更深层的认知。当然，进一步研究的困难依然很大，但终究迈开了第一步。正像从物质向能量的转换一样，虽然过去了几十年，目前除了 H 族和放射性物质外，尚未发现高价元素物质完全或部分转化为能量的实验案例。

还有一个问题是：质能方程中的常数项是否有必要验证？或许此常数项可能预示着质量与能量之间的关系，以及与遍布宇宙中的“光子”大家族有着不可逾越的、不能分割的关联。

为了对质能方程有全面的理解，及了解其中更深层次的内涵，似乎应该把目光放在广袤的宇宙空间，或许会发现更多、更深刻的物理现象，揭开更多宇宙规律。质能方程表明：能量守恒、质量守恒等相关的、最基础的物理学定律和定理，在宇宙空间也是成立的。一个可能的例子是黑洞。从爱因斯坦相对论预言宇宙间存在“黑洞”，到近年来观测到黑洞，差不多用了近百年的时间。目前，从对黑洞的观测和了解看，巨大黑洞或许与大爆炸理论所描述的“奇”点相似。但黑洞不是一个点，其内部或者附近最有可能是实现质能方程所预示的质能双向转换的地方。被黑洞吸积的物质，包括气体、光子 (能量包) 等，在机理尚未发现和认知的黑洞内部，这些物质和能量被碾碎、破坏，在其结构转化为低价元素或能量的同时，由于“强磁场”、“极高温”、“极高压”、“剧烈地相互碰撞”等因素，可能促使以“能量包”形式存在的光子家族转化为物质。像布莱特 • 惠勒理论预测的那样，不仅仅是高能量的光子，很可能众多低能量的光子，在黑洞内部特定的环境内也能够转化为物质。

黑洞内部的条件或许近期内在实验室难实现，但是，观测、研究黑洞周边发生的情景还

是有助于了解、推测黑洞内部的机制。布莱特 • 惠勒理论指出：在高度集中的离子中，发射由伽马射线光子组合的激光相互撞击，直接从光子转换成物质的想法或许在实验室还有可能实现，前提是要等待这样的激光器的发明。布莱特等人在提出该理论时也知道，在当时的实验条件下是不可能实现的，因此给出了替代方案。即便是替代方案，也是经过近百年才完成。完成这个实验既需要对该理论有超常认知，同时也需要有足够的耐心，实验者花费了近十年的努力才完成。这样的实验，对于实验者和实验室的组织者，都需要足够的耐心才行。近年来，由于物理观测手段和观测精度大幅提高，加强了对宇宙的观测能力。这个能力可以辅助完成在地球上难以实现的实验，特别是对星系中心黑洞的观测尤其重要。其观测结果能够对许多重要的物理定律加深理解。

一个可能的例子是黑洞吸积的喷流现象。靠近黑洞区域的喷流中物质的起源一直是大家非常感兴趣的问题。目前学者提出的一个理论可以作为能量转化为物质的例子[2]。该理论认为，在旋转黑洞的轴区，当存在一定量的净电荷时，可以存在稳态的、轴对称的解，使得电子/正电子所受电场力和洛伦兹力之和为零。当存在某种扰动时，净电荷的量增加或减少后，就会使得平行于磁力线方向的电场发生变化。此时，电子/正电子的受力平衡被破坏，电子/正电子会受到沿着磁力线方向的净电场力，电子/正电子会被电场沿着磁力线加速到极高能量。极高能量的电子/正电子碰到了周围环境的低能光子后，会产生高能伽玛射线。伽玛射线再与周围环境的低能光子碰撞并最终变成正负电子对。新产生的电子/正电子同样会被加速、辐射高能光子、与低能光子再碰撞产生新的正、负电子对。该过程中，磁场的保持需要黑洞的自旋。而转换为正、负电子对的最终能量来源为黑洞自旋能量。该模型提供了一个从能量转化为物质的可能性。期待下一代 EHT (Event horizon telescope) 国际合作项目能给这一重要问题提供关键线索。

总之，物理学界尚欠缺、了解质能方程深厚的内涵。大道从简的质能方程显示了宇宙世界原本的单纯，像方程本身那样简洁和优雅。当我们在逐步清晰其内涵的过程中，或许能够揭示宇宙更深层的奥秘!

致谢

作者感谢上海天文台的袁峰研究员向作者指出了本文提到的、旋转黑洞的喷流中物质起源的模型。

参考文献：

[1] Adam J, Adamczyk L, Adams J R, et al. Measurement of e+e- Momentum and Angular Distributions from Linearly Polarized Photon Collisions. Phys Rev Lett. 2021, 127: 2302

[2] Hirotani K, Okamoto L. ApJ, 1998, 497: 563

Can the Mass-Energy Equation Predicted Physics be

Realized in the Vicinity of the Super-massive Spining Black Hole in a Galaxy Center?

GE Bao-an[1], BU De-fu[2]

(1. Tianjin Association for Science and Technology, Tianjin 300041, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper discusses the mass-energy relationship proposed by Einstein. That equations suggests the possibility that energy and matter may be converted into each other. It is well known that matter can be converted into energy via nuclear reaction. But whether energy can be converted into matter in some conditions? This paper discusses this issue. The relevant experiments in particle physics are reviewed. Especially, there is one type of model about mass loading in black hole jets. We suggest that this model likely serves as an example of energy-to-matter conversion.

Key words: Mass-Energy Equation; photon; black hole; conservation